高效率熱泵冷凝乾燥系統應用研究

黃禮棟[1], 邱相文[2], 蔡致榮[3], 林建志[2]

[1]行政院農委會農業試驗所 研究員
[2]行政院農委會農業試驗所 助理研究員
[3]行政院農委會農業試驗所 研究員兼主任秘書

摘要

國際能源價格持續上漲聲中，節能及提升能源效率已成為焦點。熱泵吸取空氣中或水體中的熱能，經過 Rankine cycle之蒸發、壓縮、膨脹等過程，將熱能由較低處移往較高處，效率高又節能，因此使用熱泵取代柴油或瓦斯以節省能源支出，已使熱泵成為熱門之工具。熱泵系統運轉時同步產生冷氣及熱氣，因此其能源效率極高，依介質區分型式為空氣對水與水對水二種，本研究使用水對水熱泵系統。利用其產生之熱氣乾燥農產品及冷氣凝結乾燥過程中產生的水蒸氣，此乾燥方式可使農產品呈現良好色澤，除了提升乾燥農產品品質外，也提升能源利用效率，為節能減碳的有效利用方式。本所設置完成之熱泵系統冷凝乾燥機，經熱交換器交換後之乾燥熱風溫度可達65℃，冷水溫度達到12℃，能源效率(COP)值達到3.6以上。

關鍵詞：熱泵、冷凝乾燥、能源效率。

一、前言

台灣極大部份能源仰賴進口，在今日氣候變遷劇烈及石化能源日益枯竭致使燃油價格越來越高漲之情形下，原先使用燃料油、柴油等做為冬季加溫燃料及乾燥能源之成本也不斷攀升，在必須有效的運用各種能源情形下，各種節能技術也一一被探討，以降低生產成本兼收減量排放二氧化碳之目的。俱高效節能功效之熱泵應用遂成為再生能源中重要的研究領域。熱泵之作用原理為Rankine Cycle，由壓縮機、冷凝器、膨脹閥與蒸發器等四個主要元件以管路連接組成，以冷媒為傳導介質，以產生移動熱能的作用。其原理為藉由輸入電能驅動壓縮機，經環路中冷媒之吸熱、放熱作用，熱能由蒸發器吸收，而後由冷凝器排出，形成移動熱能的效果，達成製冷、製熱之雙重目的。經熱交換後之冷、熱氣經風管輸送，可應用於溫室、住家等的加溫或降溫，具有節能、無汙染且運轉費用低之特點。熱泵應用在同時需要冷氣(冷水)與暖氣(熱水)的地方，其節能效應更可觀，像是旅館、飯店、養殖業、農業、食品加工業等，當同時使用冷氣與暖氣時，其COP值可高達9~11(方，2010)。農產品乾燥後可延長保存期限並紓解盛產期滯銷與價格暴跌問題，故長期以來業者及農政單位持續研究改進乾燥方法，以期除了乾燥的基本功能外，並能保存農產品的風味、產生良好色澤而又節省能源。冷凝乾燥系統利用到加熱及冷凝兩個子系統，乾燥之農產品除了呈現優良色澤外也因乾燥筒較為封閉，對香氣保存十分良好，為目前最佳的乾燥方法之一。Colak and Hepbasli (2009) 研究指出熱泵乾燥系統已經行之有年，發展出許多不同種類的HPD(heat pump drying)，可以配合各種不同的乾燥產品特性，尤其是熱敏感度高的產品，

應選擇適合的HPD進行乾燥，常應用在乾燥蔬菜、水果以及生物材料上。本所研究將熱泵產生之熱氣及冷氣經熱交換後應用於冷凝乾燥機並試驗其乾燥農產品之效果，並利用HIOKI-3197型電力品質分析儀及電子式溫度計等儀器量測計算其效率值，經試驗分析結果其COP值達3.6以上。

二、材料與方法

本系統使用之熱泵冷凝乾燥機(圖1)係由一部5USRT之熱泵主機、一個500公升之熱水儲水桶、300公升之冷水儲水桶，一台裝置冷水/冷氣交換器、熱水/熱氣交換器之冷凝乾燥箱體、水閥門、控制電路及冷、熱水管路與馬達等組成。熱泵主機以220V三相電力推動，啟動後，將熱水桶之水漸漸加熱至預定溫度，一般乾燥使用時，只需待水溫加熱至高於熱風溫度5℃即可經熱交換產生需要之熱風，即70℃熱水經熱交換可產生65℃之熱風供乾燥用，而熱泵加熱之同時，冷水桶之水溫也隨之降低，可低至12℃以下。

為探討無乾燥物狀態下乾燥箱內溫溼度的變化及各點溫度之差異，試驗之前先在乾燥箱內擺放9個MicroLogPRO-EC750溫溼度感測器(如圖2，其在-30℃~90℃範圍內間之解析度優於0.3℃，精確度在1℃以內)，於調整時間及數據歸零後啟動置入乾燥箱體上層之四個角落，中層之中央位置及下層之四個角落(如圖3所示)，並在控制器上設定其冷熱風之循環方式為加溫達45℃後，改為冷風降溫至40℃，再變為熱風模式之循環，本次試驗進行之冷熱風循環一次約需20分鐘，共進行三次約70分鐘。

圖 1 熱泵乾燥系統

圖 2 MicroLogPRO-EC750 及溫度探針

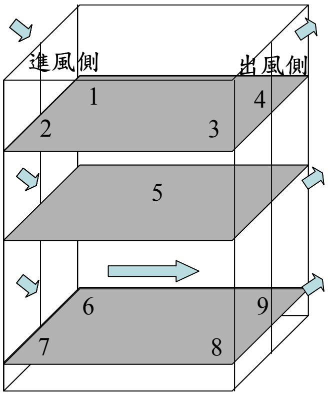

圖 3 溫溼度感測器位置示意圖(箭頭表示風向)

圖 4 HIOKI-3197 電力品質分析儀

另一次試驗除了量測熱水溫度、冷水溫度、用電度數等各項參數隨時間之變化以換算為總能源效率(COP)之外(用電度數係利用圖4之HIOKI-3197電力品質分析儀進行量測)，也利用鮮香菇及約3 mm厚之生山藥切片兩種材料試驗乾燥效果。鮮香菇之含水率一般為85~90%之間，傳統香菇之乾燥方式，以35~40℃為開始乾燥之溫度，並以每小時升溫不超過5℃漸次加溫至65~70℃。試驗之鮮香菇重20公斤，將之均勻分佈於層架式乾燥盤上。乾燥之冷、熱氣循環交換模式設定為先送熱風至乾燥箱，使箱內空氣達到預定溫度後轉為送冷風使乾燥箱降溫至設定溫度，同時將乾燥產生之水蒸氣凝結成水滴，之後再通熱風乾燥，如此循環至農產品水份達到預定乾燥含水率為止。圖5為乾燥後之香菇，含水率約為11~14%。圖中顯示以此乾燥機乾燥之乾菇無烤焦、過度皺縮等外觀現象發生。另乾燥產生之水蒸氣經冷風凝結為水滴後由排水槽收集，可直接排放或以容器收集。

三、結果

以HIOKI-3197型電力品質分析儀量測記錄用電情形，在大氣溫度21℃~22℃之條件下量測COP值，在熱水出水溫度為30℃~40℃之範圍時，COP值為4.2；40℃~50℃之範圍，COP值為4.0；50℃~60℃之範圍，COP值為3.6 (表1)。由於能源價格攀升，為節省能源費用，利用熱泵製熱具有利因，熱泵之節能效益(設COP=3.6)與其他熱源之比較經計算後列於表2。圖6為空車時乾燥箱內中間層中點溫濕度圖。本次實驗過程熱風冷風循環三次，左邊Y軸代表溫度(◆，℃)；右邊Y 軸代表濕度(×，%)；X軸代表時間(min)；而兩條直線代表本次實驗所設定的溫度範圍。在任意時間點乾燥箱內各部位溫濕度的差異不大，可視乾燥箱內為一均溫均濕的環境。當熱泵乾燥系統升溫時乾燥箱內濕度會下降；反之，當熱泵乾燥系統降溫時乾燥箱內濕度會上升。茲將同一時間各測點第一個熱冷循環之最高溫與最低溫之資料列於表3供參考，其中測點8之溫度數據顯示差異頗大，推測係溫度探針損壞或轉換電路故障導致，故不列入。

圖5 乾燥後香菇

表1 熱泵效率測試資料

		一		二		三	
		熱水溫度 (℃)	電功率 (kw)	熱水溫度 (℃)	電功率 (kw)	熱水溫度 (℃)	電功率 (kw)
	0	34.3	4.12	42.3	4.51	51.4	5.51
時間(分)	15	38	4.38	48.3	5.22	56.9	6.31
	25	42.3	4.51	51.4	5.51	60.8	6.5
COP		4.2		4		3.6	

註：操作環境溫度：21~22℃；電功率量測：HIOKI-3197電力品質分析儀

表 2 節能效益

熱能來源	能源別	能源單價	熱 值	能源轉換效率	熱能/NT$	熱能成本比
電 熱	電 力	3.62 元/度	860 kcal/度	95%	226 kcal	3.78
瓦 斯	天然瓦斯	20.2 元/公斤	9,000 kcal/m^3	90%	476kcal	2.17
柴油鍋爐	柴 油	33.5 元/公斤	8,800 kcal/公升	85%	223kcal	3.84
燃油鍋爐	燃料油	21.2 元/公升	9,200 kcal/公升	85%	368 kcal	2.33
熱 泵 COP=3.6	電 力	3.62 元/度	3,098 kcal/度	100%	856 kcal	1.00
	二段式離峰電力	1.80 元/度	3,098 kcal/度	100%	1,721 kcal	0.497

資料來源：台灣中油/台灣電力公司 全球資訊網 2013/09/09

表 3 各測點第一個循環之最高溫度值及最低溫值

測 點	1	2	3	4	5	6	7	8	9
第一循環最高溫℃	45.6	45.8	45.8	45.2	46.0	45	45.2	--	44.6
第一循環最低溫℃	40.4	40.2	40.2	40.4	40.4	40.8	40.4	--	41.0

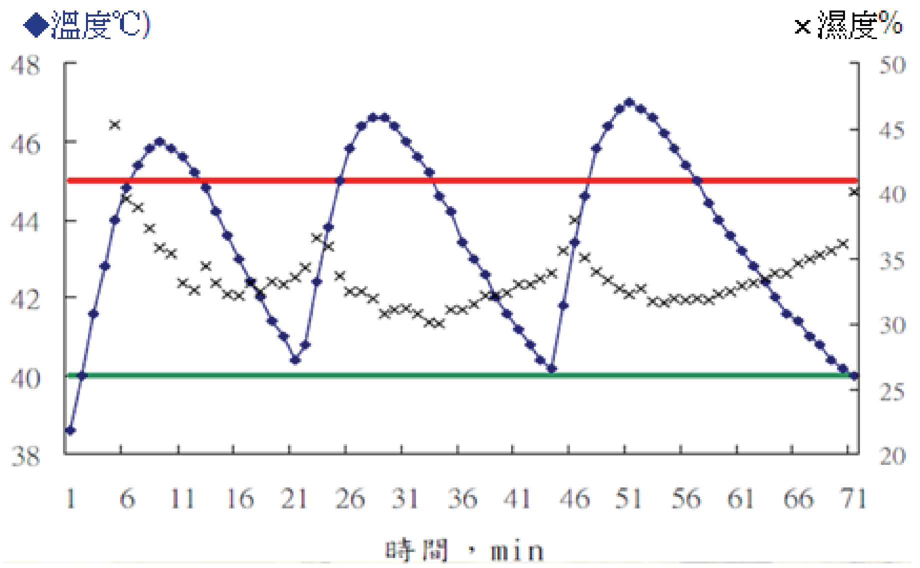

圖 6 乾燥箱中間層中點三次循環溫、濕度變化

四、討論

本所設置完成之熱泵系統冷凝乾燥機，經熱交換器交換後之乾燥熱風溫度可達 65℃，冷水溫度亦達到 12℃以下，能源效率(COP)值達到 3.6 以上，若要提升熱風溫度，目前已有利用二氧化碳冷媒(R744)之熱泵最高出水溫度可達 90℃(Petersen, M., et al.)，經交換器產生之熱風約可達 85℃，且二氧化碳冷媒對地球環境友善之特性，是一大優點。一般通熱風乾燥機乾燥香菇，發現乾燥時間不經濟且香味易散失，若改用本系統則可以有效改善香味散失之缺點。本乾燥機因為組成零組件較多及需要配管空間等，需要相當面積與空間安裝設置。因熱泵冷凝乾燥機具有良好能源利用效果與乾燥產品品質，若能以較大容量之熱泵應用於個別控制之並聯乾燥機箱上並依不同乾燥農產品加以個別控制，除提升產品品質外也可發揮較佳節能效益。

將乾燥之冷、熱氣循環交換設定為送熱風使箱內空氣達到預定溫度後轉為送冷風至設定溫度之循環模式，或者同時送冷、熱風而將部份熱風導至另一空間冷卻去除水蒸氣後再加溫回送至乾燥箱為較佳之乾燥方式，有待進一步探討。

參考文獻

1. 方煒。2010。低耗能人工光源與高效能熱泵技術在農業之應用研發。農業工程與節能減碳學術研討會專刊。
2. Colak, N., and A. Hepbasli. 2009. A review of heat pump drying : Part 1-Systems, models and studies. Energy Conversion and Management. 50(9):2180-2186.
3. Colak, N., and A. Hepbasli. 2009. A review of heat-pump drying : Part 2-Application and performance assessments. Energy Conversion and Management. 50(9):2187-2199.
4. Erbay, Z., and F. Icier. 2009. Optimization of drying of olive leaves in a pilot-scale heat pump dryer. Drying Technology: An International Journal.21(3)：416-427.
5. Perera, C. O., and M. S. Rahman. 1997. Heat pump dehumidifier drying of food. Trends in Food Science & Technology. 8(3):75-79.
6. Prasertsan, S., and P. Saen-saby. 1998. Heat pump drying of agricultural materials. Drying Technology: An International Journal. 16(1-2):235-250.
7. Petersen, M., Bowers, C., Elbel, S. and Hrnjak P. 2012. Development of High Efficiency Carbon Dioxide Commercial Heat Pump Water Heater. International Refrigeration andAir Conditioning Conference at Purdue, July 16-19, 2012.

A study on the Application of High Efficiency Heat Pump Condensation Drying System

Li-Duhng Huarng[1], Hsiang-Wen Chiu[2], Jyh-Rong Tsay[3], Jian-Jhih Lin[2]

[1] Senior Agricultural Engineer, Taiwan Agricultural Research Institute, COA
[2] Assistant Agricultural Engineer, Taiwan Agricultural Research Institute, COA
[3] Senior Agricultural Engineer & Secretary General, Taiwan Agricultural Research Institute, COA

Abstract

As the energy prices continued to hike internationally, saving energy and improving efficiency have become the focus issue. Heat pumps absorb heat in the ambient air or water through the evaporation, compression and expansion process of the Rankine cycle that transfers the heat energy in an opposite direction of spontaneous heat flow. The system is energy efficient and saves a lot of energy. The application of heat pumps has become a hot tool to replace the diesel or gas burner in order to save energy costs effectively.

The operation of a heat pump system generates both heat and cold simultaneously; therefore, it provides high energy efficiency. According to the source and destination of the heat, the heat pumps can be categorized into air-water heat pumps and water-water heat pumps. A water-water heat pump system was adopted in this study. The application of its hot air in drying agricultural products and cold air in condensing water vapor generated in the drying process allows agricultural products using this drying method showing good color. In addition to improve the drying quality of agricultural products, it also promotes energy efficiency. It is an effective way to save energy and reduce carbon emission. The heat pump condensing dryer set up in TARI can provide 65℃ hot air for drying through the heat exchanger and the cold water temperature reaches as low as 12℃. The total energy efficiency of the system (COP) is above 3.6.

Keywords: Heat pump, Condensation drying, Coefficient of performance.